

研究生教学用书

# 交流电机 动态分析

汤蕴璆 张奕黄 范瑜 编著

机械工业出版社



研究生教学用书

# 交流电机动态分析

汤蕴璆 张奕黄 范瑜 编著  
徐怡 主审



机械工业出版社

本书共7章。第1章是预备知识,主要说明交流电机动态分析的特点、步骤和基本方法,包括坐标变换、等效电路、运动方程和状态方程的建立及其解法。第2~6章阐明在常用的各种坐标系中,感应电机和同步电机的运动方程、运算电抗和状态方程的导出,许多经典电磁瞬态问题的解法和一些典型动态问题的求解。第7章简要地介绍变频器供电时交流电机的分析。书末有6个附录,包括感应电机和同步电机动态计算的两个源程序,使读者掌握基本理论后,可较快地进入实际问题的动态计算。

本书是高等学校电气工程系的研究生教材,也可供高等学校教师以及电机设计和运行方面的工程技术人员作为参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

交流电机动态分析/汤蕴璆等编著. - 北京:机械工业出版社, 2004.10

研究生教学用书

ISBN 7-111-15321-9

I. 交... II. 汤... III. 交流电机-动态-分析-研究生-教材 IV. TM340.13

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第098333号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:卢若薇 版式设计:冉晓华 责任校对:李秋荣

封面设计:鞠杨 责任印制:李妍

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2005年1月第1版·第1次印刷

1000mm×1400mm B5·9.75印张·358千字

定价:28.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

## 前 言

“交流电机瞬态分析”是电机及其控制专业研究生的一门学位课程，但是到目前为止，尚没有一本合适的教材。在同步电机方面，国内有几本专著，但是篇幅一般较大，内容稍偏，并且缺少动态分析的内容；感应电机方面可作为教材的著作更少。国外方面1985年以后有几本较好的专著，但篇幅一般较大；有的偏重于用模拟计算机求解，有的着重用空间向量法进行分析，对同步电机中许多经典的瞬态问题较少涉及。有鉴于此，编写一本适合于研究生使用、篇幅适中的教材是十分必要的。

本书的特点是：①理论与实际并重。一方面对交流电机瞬态和动态分析的基本理论，如坐标变换，常用坐标系中交流电机的运动方程，状态方程及其解法，运算电抗和等效电路等内容，给予较大的重视；另一方面对交流电机运行中发生的许多实际问题，如突然短路问题，动态运行问题等，都有较为详细的分析和阐述；最后在附录中列出感应电机和同步电机动态计算的两个源程序，使读者一旦掌握了基本理论，即可较快地进行各种实际动态问题的计算。②同步电机和感应电机并重。由于同步电机和感应电机的理论和分析方法有许多内在的联系，加上在电力系统和工业企业中这两种电机应用十分广泛，因此在内容选择上，作者采用同步电机和感应电机两者并重的方针。③瞬态问题和动态问题兼顾。交流电机的瞬态研究已有70多年的历史，许多问题及其解答已成为经典知识，读者应当了解或掌握，以便在解决同类问题时有所遵循和借鉴。至于动态问题，则是近20年来国际上的研究方向和重点。由于动态问题的运动方程是非线性微分方程组，过去无法求解，现在可以用计算机和数值法求得具体问题的数值解；另外，某些问题过去在一系列假定下得到了近似的解析解，现在需要重新审视、检查其结果；总之这方面还有许多工作要做。作者希望，本书的出版能为此起到一定的推动作用。④篇幅适中。本书正文30多万字，主要内容可作为研究生教材，部分内容则可作为深入进行科研工作的引导。

本书的前6章和附录A、B、C、D由汤蕴璆编写，第7章由张奕黄和范瑜编写，附录E由沈阳工业大学谢德馨教授编制，附录F由沙洲工学院汤晓燕讲师编制。全书承哈尔滨大电机研究所徐怡高级工程师审稿，并提出许多宝贵意见，对此作者表示深切的谢意。本书的出版得到北京交通大学电气工程学院领导的大力支持，作者亦向他们表示感谢。

作 者  
于北京交通大学  
2004年4月

## 主要符号表

$A$	状态方程中的系统矩阵	$H$	机组的惯性常数
$a$	$120^\circ$ 相量算子	$h$	时间步长
$\mathbf{a}$	$120^\circ$ 向量算子	$I_d, I_q$	同步电机直轴和交轴电流 $i_d, i_q$ 的拉氏变换
$B$	状态方程中的控制矩阵	$I_f$	同步电机励磁电流 $i_f$ 的拉氏变换
$C$	新、旧坐标系之间电流(电压)的变换矩阵	$I_D$	同步电机直轴阻尼绕组电流 $i_D$ 的拉氏变换
$C_s$	定子电流的变换矩阵	$\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$	定子 A 相、B 相和 C 相的电流相量
$C_r$	转子电流的变换矩阵	$\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$	感应电动机转子 a 相、b 相和 c 相的电流相量
$E_{0m}$	同步电机定子激磁电动势的幅值	$\dot{I}_+, \dot{I}_-, \dot{I}_0$	相量对称分量变换中的正序、负序和零序电流相量
$e_1, e_2, e_3$	三回路电路中回路 1、2、3 的外加电动势	$\dot{I}_d, \dot{I}_q$	同步电机定子的直轴和交轴电流相量
$e_d, e_q$	在 $dq0$ 坐标系中电动势的直轴和交轴分量	$\dot{I}_{d(M)}, \dot{I}_{q(M)}$	采用电动机惯例时, 同步电机定子的直轴和交轴电流相量
$e_f, e_b$	在 $fb0$ 坐标系中电动势的前进和后退分量	$\dot{I}_{s1}$	感应电动机的定子基波电流相量
$F(t)$	计及电阻影响时, 线间或单相突然短路时定子短路电流中基波和奇次谐波项的修正因数	$\dot{I}_{sk}$	感应电动机的定子 $k$ 次谐波电流相量
$F(s)$	$f(t)$ 的拉氏变换	$\dot{I}'_{s1}$	感应电动机转子基波电流相量的归算值
$F$	旋转电压系数矩阵	$I_f(t)$	计及电阻时, 线间或单相短路时励磁电流瞬态自由分量的修正项
$F'$	坐标变换后, 在新坐标系中的旋转电压系数矩阵	$I_D(t)$	计及电阻时, 线间或单相短路时直轴阻尼绕组电流的修正项
$G(t)$	计及电阻影响时, 线间或单相突然短路时定子短路电流中直流和偶次谐波项的修正因数	$I_s$	$i_s$ 的拉氏变换
$G_f(p)$	用微分算子 $p$ 表达时励磁绕组的传递函数	$I'_r$	$i'_r$ 的拉氏变换
$G_f(s)$	励磁绕组的传递函数	$i_A, i_B, i_C$	同步电机(感应电机)定子 A 相、B 相和 C 相电流的瞬时值
$G_D(s)$	直轴阻尼绕组的传递函数	$i_a, i_b, i_c$	感应电动机转子 a 相、b 相和 c 相电流的瞬时值
$G'$	旋转电感矩阵(转矩矩阵)	$i_d, i_c, i_f$	双笼型电动机下笼等效三相绕组
$g$	逆变器的开关函数		
$g_{ABC}, g_{\alpha\beta 0}$	在 $ABC$ 和 $\alpha\beta 0$ 坐标系中逆变器的开关矩阵		

	电流的瞬时值		定子电流的空间向量
$i_{\alpha}, i_{\beta}, i_0$	$\alpha\beta 0$ 坐标系中的 $\alpha$ 轴、 $\beta$ 轴和零序电流	$i'$	坐标变换后,在新的坐标系中转子的电流矩阵;在定子坐标系中转子的电流的空间向量
$i_d, i_q$	$dq0$ 坐标系中的直轴和交轴电流	$i'_{s0}$	在转子坐标系中感应电动机定子的理想空载电流向量
$i_1, i_2$	120 坐标系中的瞬时值正序和负序电流;三回路电路中回路 1 和 2 的回路电流	$i_{sk}, i_{rk}$	在任意转速的通用坐标系中定子电流和转子电流的空间向量
$i_3$	三回路电路中回路 3 的回路电流	$J$	机组的转动惯量
$i_f$	同步电机的励磁电流; $f\beta 0$ 坐标系中电流的前进分量	$J_r$	电机的转动惯量
$i_b$	同步电机定子电流的基值; $f\beta 0$ 坐标系中电流的后退分量	$K$	克利斯多夫电压系数矩阵
$i_D$	直轴阻尼绕组电流	$k$	定、转子绕组的变比
$i_Q$	交轴阻尼绕组电流	$k_D$	阻尼转矩系数
$i_{\alpha}, i_{\beta}, i_0$	在定子 $\alpha\beta 0$ 坐标系中定子的 $\alpha$ 轴、 $\beta$ 轴和零序电流	$k_s$	整步转矩系数
$i_{ra}, i_{rb}, i_{r0}$	在转子 $\alpha\beta 0$ 坐标系中转子的 $\alpha$ 轴、 $\beta$ 轴和零序电流	$\bar{k}_D$	$k_D$ 的加权平均值
$i_{rd}, i_{rq}$	在 $dq0$ 坐标系中感应电机转子的直轴和交轴电流	$\bar{k}_s$	$k_s$ 的加权平均值
$i_{d(M)}, i_{q(M)}$	采用电动机惯例时,同步电机定子的直轴和交轴电流	$k_1, k_2, k_3, k_4$	状态向量的增量
$i_{fb}$	励磁电流的基值	$k_{if}$	定子基值电流与励磁绕组基值电流之比
$i_{Db}, i_{Qb}$	直轴和交轴阻尼绕组电流的基值	$k_{uf}$	定子基值电压与励磁绕组基值电压之比
$i_{aM}, i_{rT}$	在 $MT$ 坐标系中,感应电机定子电流的 $M$ 轴和 $T$ 轴分量	$k_{iD}$	定子基值电流与直轴阻尼绕组基值电流之比
$i_{rM}, i_{rT}$	在 $MT$ 坐标系中,感应电机转子电流的 $M$ 轴和 $T$ 轴分量	$k_{uD}$	定子基值电压与直轴阻尼绕组基值电压之比
$i$	整个电机的电流矩阵;电流的空间向量	$L_s$	计及定子相邻两相的互感作用后,感应电机定子每相的总自感(即同步电感)
$i'$	坐标变换后,在新的坐标系中整个电机的电流矩阵	$L_r$	计及转子相邻两相的互感作用后,感应电机转子每相的总自感
$i_s$	定子电流矩阵;定子电流的空间向量	$L_a, L_{\beta}$	在 $\alpha\beta 0$ 坐标系中 $\alpha$ 轴和 $\beta$ 轴的自感
$i_r$	转子电流矩阵;转子电流的空间向量	$L_d$	直轴同步电感
$i'_s$	坐标变换后,在新的坐标系中定子的电流矩阵;在转子坐标系中	$L_q$	交轴同步电感
		$L_0$	零序电感
		$L_b$	定子电感的基值
		$L_s$	同步电机的定子漏感
		$L'_s$	感应电机定子的瞬态电感

$L'_r$	感应电机转子的瞬态电感	$M_1$	双笼型电机下笼等效三相绕组间互感的负值
$L$	整个电机的电感矩阵	$M_4$	双笼型电机上笼与下笼对应相之间的互感
$L_s$	定子绕组的自感矩阵	$M_5$	双笼型电机上笼与下笼非对应相之间的互感
$L_r$	转子绕组的自感矩阵	$M_6$	双笼型电机上、下笼的互漏感
$L'$	坐标变换后,在新的坐标系中整个电机的电感矩阵	$M_m$	$M_m$ 的 $\frac{3}{2}$ 倍
$L'_s$	坐标变换后,在新的坐标系中定子的自感矩阵	$M'_r$	归算到定子边时 $M_r$ 的归算值
$L'_r$	坐标变换后,在新的坐标系中转子的自感矩阵	$M_{sr}$	感应电机定、转子相绕组间互感的幅值
$L_{AA}, L_{BB}, L_{CC}$	同步电机定子 A 相、B 相和 C 相绕组的自感	$M'_{sr}$	归算到定子边时 $M_{sr}$ 的归算值
$L_{s0}$	同步电机定子每相自感中的恒定分量(平均值)	$M_{AB}(M_{BA}), M_{BC}(M_{CB}), M_{CA}(M_{AC})$	同步电机定子 A、B 相、B、C 相和 C、A 相绕组间的互感
$L_{s2}$	同步电机定子每相自感中的二次谐波幅值	$M_{s0}$	同步电机定子三相绕组间互感的恒定分量(平均值)
$L_{ff}$	励磁绕组的自感	$M_{s2}$	同步电机定子三相绕组间互感中二次谐波的幅值
$L_{DD}$	直轴阻尼绕组的自感	$M_{Af}(M_{fA}), M_{Bf}(M_{fB}), M_{Cf}(M_{fC})$	同步电机定子 A、B、C 相绕组与励磁绕组间的互感
$L_{QQ}$	交轴阻尼绕组的自感	$M_{AD}(M_{DA}), M_{BD}(M_{DB}), M_{CD}(M_{DC})$	同步电机定子 A、B、C 相绕组与直轴阻尼绕组间的互感
$L_{fb}$	励磁绕组电感的基值	$M_{Aq}(M_{qA}), M_{Bq}(M_{qB}), M_{Cq}(M_{qC})$	同步电机定子 A、B、C 相绕组与交轴阻尼绕组间的互感
$L_{Db}$	直轴阻尼绕组电感的基值	$M_{sf}$	同步电机定子相绕组与励磁绕组间互感的幅值
$L_{sa}$	感应电机定子绕组每相的自感	$M_{sd}$	同步电机定子相绕组与直轴阻尼绕组间互感的幅值
$L_{sr}$	感应电机转子三相绕组每相的自感	$M_{sq}$	同步电机定子相绕组与交轴阻尼绕组间互感的幅值
$L_{tt}$	双笼型电动机下笼等效三相绕组每相的自感	$M_{fd}$	励磁绕组与直轴阻尼绕组间的互感
$L'_{rr}$	归算到定子边时 $L_{rr}$ 的归算值	$M_{sf}(M_{fs})$	在 $\alpha\beta$ 坐标系中,同步电机定子 $\alpha$ 、 $\beta$ 轴绕组间的互感
$L_{\alpha\alpha}, L_{\beta\beta}$	在 $\alpha\beta$ 坐标系中同步电机定子 $\alpha$ 轴和 $\beta$ 轴的自感		
$L_{sd}$	直轴电枢反应电感		
$L_{sq}$	交轴电枢反应电感		
$L_{\sigma s}$	感应电机定子绕组的漏感		
$L_{\sigma r}$	感应电机转子绕组的漏感		
$L_s(s)$	感应电机定子的运算电感		
$M_s$	感应电机定子三相绕组间互感的负值		
$M_r$	感应电机转子三相绕组间互感的负值		

$M_{st}, M_m$	感应电机(同步电机)转子绕组对定子绕组和定子绕组对转子绕组的互感矩阵	$T_e$	电磁转矩
$P_e$	电磁功率	$T_L$	负载转矩
$P_n$	转换功率	$T_1$	原动机的驱动转矩
$P_2$	同步发电机定子端的输出功率	$T_{st}$	感应电动机的起动转矩
$p$	时间的微分算子( $p = \frac{d}{dt}$ )	$T_{e0}$	工作点 0 处的电磁转矩
$p_0$	极对数	$T_{e(av)}$	电磁转矩的平均值
$R$	电阻	$T_{e(2st)}$	以频率 $2s\dot{\tau}$ 脉振的脉振电磁转矩
$R_s$	感应电机定子的每相电阻	$T_s$	转子开路时感应电机定子绕组的时间常数
$R_r$	感应电机三相转子的每相电阻	$T_r$	定子开路时感应电机转子绕组的时间常数
$R_l$	双笼型转子下笼等效三相绕组的每相电阻	$T'_s$	感应电机定子的瞬态时间常数
$R'_r$	归算到定子边时 $R_r$ 的归算值	$T'_r$	感应电机转子的瞬态时间常数
$R_a$	同步电机定子(电枢)的每相电阻	$T_a$	同步电机的电枢时间常数
$R_f$	励磁绕组电阻	$T_f$	励磁绕组的时间常数
$R_D$	直轴阻尼绕组电阻	$T_D$	直轴阻尼绕组的时间常数
$R_Q$	交轴阻尼绕组电阻	$T_Q$	交轴阻尼绕组的时间常数
$R_0$	零序电阻	$T'_f$	励磁绕组的瞬态时间常数(定子短路、直轴阻尼绕组开路)
$R_-$	负序电阻	$T'_D$	直轴阻尼绕组的瞬态时间常数(定子短路、励磁绕组开路)
$R_n$	旋转阻力系数	$T'_Q$	交轴瞬态时间常数
$R$	整个电机的电阻矩阵	$T''_d$	直轴超瞬态时间常数
$R_s$	定子绕组的电阻矩阵	$T''_q$	交轴超瞬态时间常数
$R_r$	转子绕组的电阻矩阵	$T''_{d0}$	定子开路时的直轴瞬态时间常数
$R'$	坐标变换后,在新的坐标系中整个电机的电阻矩阵	$T''_{q0}$	定子开路时的直轴超瞬态时间常数
$R'_s$	坐标变换后,在新坐标系中定子的电阻矩阵	$T_{D\sigma}$	直轴阻尼绕组的漏磁时间常数
$R'_r$	坐标变换后,在新坐标系中转子的电阻矩阵	$T_{f\sigma}$	励磁绕组的漏磁时间常数
$S_b$	视在功率的基值	$T_{s1}$	单相突然短路时同步电机的电枢时间常数
$s$	转差率;拉氏变换中的复变量	$T_{s2}$	线间突然短路时同步电机的电枢时间常数
$s_k$	感应电动机转子对 $k$ 次时间谐波磁场的转差率	$T'_{d1}$	单相突然短路时的直轴瞬态时间常数
$T$	转矩;时间常数	$T''_{d1}$	单相突然短路时的直轴超瞬态时间常数
$T_b$	转矩的基值	$T'_{d2}$	线间突然短路时的直轴瞬态时间



	常数	$u_r$	转子的电压矩阵;转子电压的空间向量
$T_{\alpha\beta}^{\omega}$	线间突然短路时的直轴超瞬态时间常数	$u'$	坐标变换后,在新的坐标系中整个电机的电压矩阵
$T$	$\alpha\beta 0$ 坐标系中的 $60^\circ$ 对称性矩阵	$u'_s$	转换到新坐标系中时定子的电压矩阵;转换到转子坐标系时定子电压的空间向量
$t$	时间	$u'_r$	转换到新坐标系中时转子的电压矩阵;转换到定子坐标系时转子电压的空间向量
$t_b$	时间的基值	$u_{sk}$	在任意转速的通用坐标系中定子电压的空间向量
$U_d, U_q$	同步电机直轴和交轴电压 $u_d$ 和 $u_q$ 的拉氏变换	$u_{rk}$	在任意转速的通用坐标系中转子电压的空间向量
$U_f$	励磁电压 $u_f$ 的拉氏变换	$v$	状态方程中的控制向量
$U_m$	定子相电压的幅值	$W'_m$	磁共能
$U_{km}$	定子 $k$ 次谐波电压的幅值	$X$	电抗
$\dot{U}_d, \dot{U}_q$	同步电机定子的直轴和交轴电压相量	$X_C$	电容 $C$ 的容抗
$U_s$	$u_s$ 的拉氏变换	$X_d$	直轴同步电抗
$u_A, u_B, u_C$	同步电机(感应电机)定子 A 相、B 相和 C 相绕组的端电压	$X_q$	交轴同步电抗
$u_a, u_b, u_c$	感应电机转子 a 相、b 相和 c 相绕组的端电压	$X_\sigma$	同步电机的定子漏抗
$u_d, u_e, u_f$	双笼型电机下笼等效三相绕组的端电压	$X_0$	同步电机的零序电抗
$u_d, u_q$	在 $dq0$ 坐标系中同步电机定子的直轴和交轴电压	$X_-$	同步电机的负序电抗
$u_b$	同步电机定子电压的基值	$X_{sd}$	直轴电枢反应电抗
$u'_a, u'_b, u'_c$	归算到定子绕组时转子电压 $u_a, u_b$ 和 $u_c$ 的归算值	$X_{sq}$	交轴电枢反应电抗
$u_1, u_2$	在 $120$ 坐标系中定子电压的正序和负序分量	$X_{ff}$	励磁绕组的自感电抗
$u_\alpha, u_\beta$	在 $\alpha\beta 0$ 坐标系中同步电机定子电压的 $\alpha$ 分量和 $\beta$ 分量	$X_{lr}$	励磁绕组的漏抗
$u_f$	励磁绕组的端电压	$X_{sl}(X_{lr})$	定子相绕组与励磁绕组间互感电抗的幅值
$u_{fb}$	励磁绕组的基值电压	$X_{DD}$	直轴阻尼绕组的自感电抗
$u_{m\alpha}, u_{m\beta}, u_{m0}$	在 $\alpha\beta 0$ 坐标系中感应电机定子电压的 $\alpha, \beta, 0$ 分量	$X_{D\sigma}$	直轴阻尼绕组的漏抗
$u_{ra}, u_{r\beta}, u_{r0}$	在 $\alpha\beta 0$ 坐标系中感应电机转子电压的 $\alpha, \beta, 0$ 分量	$X_{sD}(X_{D\sigma})$	定子相绕组与直轴阻尼绕组间互感电抗的幅值
$u$	整个电机的电压矩阵	$X_{rD}(X_{Dr})$	励磁绕组与直轴阻尼绕组间的互感电抗
$u_s$	定子的电压矩阵;定子电压的空间向量	$X_{QQ}$	交轴阻尼绕组的自感电抗
		$X_{Q\sigma}$	交轴阻尼绕组的漏抗
		$X_{m\alpha}, X_{m\beta}$	在 $\alpha\beta 0$ 坐标系中同步电机定子 $\alpha$

	轴和 $\beta$ 轴的自感电抗	$Z_0$	三相电机的零序阻抗
$X_{\alpha\beta}(X_{\beta\alpha})$	在 $\alpha\beta 0$ 坐标系中同步电机定子 $\alpha$ 轴与 $\beta$ 轴的互感电抗	$Z$	整个电机的阻抗矩阵
$X_{\omega}$	感应电机的定子漏抗	$Z'$	坐标变换后,在新的坐标系中整个电机的阻抗矩阵
$X_{r\sigma}$	感应电机的转子漏抗	$Z_{m1}, Z_{m2}$	三相旋转电机的循环对称阻抗中, B 相对 A 相和 C 相对 A 相的互阻抗
$X_m$	感应电机的激磁电抗	$Z_{s1}$	感应电机定子的基波输入阻抗
$X_{M\sigma}$	双笼型电动机中上、下笼的互漏抗	$Z_{11}, Z_{22}, Z_{33}$	三回路电路中三个回路的自阻抗
$X_{D\sigma}$	励磁绕组与直轴阻尼绕组间的互漏抗	$Z_{12}, Z_{23}, Z_{31}$	三回路电路中回路 1、2、3 和 3、1 的互阻抗
$X'_d$	直轴瞬态电抗	$Z_{dq}$	$dq0$ 坐标系中 $d$ 轴和 $q$ 轴回路间的互阻抗
$X''_d$	直轴超瞬态电抗	$Z_{fb}$	励磁绕组的阻抗基值; $fb0$ 坐标系中 $f$ 轴回路和 $b$ 轴回路间的互阻抗
$X''_q$	交轴超瞬态电抗	$Z_{Db}$	直轴阻尼绕组的阻抗基值
$X'_s$	感应电机定子的瞬态电抗	$\alpha$	感应电动机三相突然短路时定子直流分量的衰减因数
$X'_{f1}$	励磁绕组的瞬态电抗	$\alpha_1, \alpha_2$	感应电动机起动瞬态时主磁场和漏磁场的衰减因数
$X_d(p), X_q(p)$	用微分算子 $p$ 表示时同步电机的直轴和交轴运算电抗	$\gamma, \gamma'$	$+90^\circ$ 和 $-90^\circ$ 旋转矩阵
$X_d(s), X_q(s)$	同步电机的直轴和交轴运算电抗	$\delta$	功角; 气隙磁场与转子磁动势的空间夹角
$X_d(js), X_q(js)$	转子转差率为 $s$ 时直轴和交轴的复运算电抗	$\theta$	感应电机转子 a 相轴线与定子 A 相轴线的夹角(电角); 同步电机转子直轴与定子 A 相轴线的夹角(电角)
$X_d(j\lambda), X_q(j\lambda)$	功角作频率为 $\lambda$ 的正弦小振荡时直轴和交轴的复运算电抗	$\theta_0$	$t=0$ 时 $\theta$ 角的初值
$x$	状态向量	$\theta_m$	用机械角表示时的 $\theta$ 角
$Y_d(js), Y_q(js)$	$X_d(js)$ 和 $X_q(js)$ 的倒数	$\lambda$	同步电机功角的振荡频率(标么值)
$Y_{dR}, Y_{dI}$	$Y_d(js)$ 的实部和虚部	$\lambda_s$	同步电机定、转子间单位面积的气隙磁导
$Y_{qR}, Y_{qI}$	$Y_q(js)$ 的实部和虚部	$\lambda_{s0}$	$\lambda_s$ 的平均值
$Z$	阻抗	$\lambda_{s2}$	$\lambda_s$ 中二次谐波的幅值
$Z_b$	定子的阻抗基值	$\sigma_D$	定子开路时励磁绕组与直轴阻尼
$Z_d, Z_q$	$dq0$ 坐标系中直轴和交轴的自阻抗		
$Z_f, Z_b$	$fb0$ 坐标系中 $f$ 轴和 $b$ 轴的自阻抗		
$Z_s$	三相电机中各相的自阻抗		
$Z_+$	三相电机的正序阻抗		
$Z_-$	三相电机的负序阻抗		

	绕组间的漏磁系数	$\psi_b$	定子磁链的基值
$\sigma'_{\text{D}}$	定子短路时励磁绕组与直轴阻 尼绕组间的漏磁系数	$\psi_{\text{D}}$	励磁绕组磁链的基值
$\varphi_k$	感应电动机稳态短路(起动)时 的功率因数角	$\psi_{\text{Dk}}$	直轴阻尼绕组磁链的基值
$\Psi_d, \Psi_q$	$\psi_d$ 和 $\psi_q$ 的拉氏变换	$\Psi_s$	定子绕组的磁链矩阵; 定子磁链 的空间向量
$\dot{\Psi}_d, \dot{\Psi}_q$	同步电机定子的直轴和交轴磁 链相量	$\Psi_r$	转子绕组的磁链矩阵; 转子磁链 的空间向量
$\psi_A, \psi_B, \psi_C$	定子 A 相、B 相和 C 相绕组的 磁链	$\Psi_r'$	转换到定子坐标系的转子磁链空 间向量
$\psi_a, \psi_b, \psi_c$	转子 a 相、b 相和 c 相绕组的磁 链	$\Psi_{sk}$	在任意转速的通用坐标系中定子 磁链的空间向量
$\psi_d, \psi_e, \psi_f$	双笼型电机下笼等效三相绕组 d、e、f 的磁链	$\Psi_{rk}$	在任意转速的通用坐标系中转子 磁链的空间向量
$\psi_f$	励磁绕组的磁链	$\Psi_s$	$\psi_s$ 的拉氏变换
$\psi_{\text{D}}$	直轴阻尼绕组的磁链	$\Psi_r'$	$\psi_r'$ 的拉氏变换
$\psi_{\text{Q}}$	交轴阻尼绕组的磁链	$\Omega$	转子的机械角速度
$\psi_\alpha, \psi_\beta, \psi_0$	在 $\alpha\beta 0$ 坐标系中 $\alpha$ 轴、 $\beta$ 轴和 零序的磁链	$\Omega_b$	机械角速度的基值
$\psi_d, \psi_q$	在 $dq0$ 坐标系中直轴和交轴的 磁链	$\omega_1$	定子(电网)的角频率
$\psi_1, \psi_2$	在 120 坐标系中正序和负序的 磁链	$\omega_b$	角频率的基值
		$\omega_r$	转子旋转的角速度(以电角计)
		$\omega_k$	通用坐标系旋转的角速度(以电 角计)



汤蕴璆 江苏溧阳人，1932年生。哈尔滨理工大学（原哈尔滨电工学院）教授，中国电工技术学会名誉理事。1953年毕业于东北工学院，1955年毕业于哈尔滨工业大学研究班。1955~1962年在哈尔滨工业大学任讲师，1962~1971年任副教授，1979年在哈尔滨电工学院任教至今。长期从事电机专业的教学和科研工作。主要研究领域为：机电能量转换机理，交流电机的动态分析，电机电磁场的分析和数值计算。1988年和1992年，先后担任北京和杭州国际电磁场问题及应用会议主席，1989~1993年担任COMPUMAG会议国际指导委员会委员。著和主编有《电机内的电磁场》，《电机理论和运行》，《电机学—机电能量转换》，《电机学》（九五国家级重点教材），《电机学》（面向21世纪课程教材）和本书等7本著作。在国内外学术刊物和国际会议上发表论文60多篇。

RA6.00/17



张奕黄 北京交通大学教授，电气学院电机与电器研究所所长，铁道学会高级会员。1981年哈尔滨电工学院研究生毕业，电机及其控制研究方向，主持和参加了：电动汽车电机及其控制系统，电机优化，开关磁阻电动机等63重大专项、国家重点攻关等十几个科研项目，获省部级科技进步奖3项。参加编写了《现代电机设计》、《电机学》等教材。



范瑜 北京交通大学电气工程学院教授，1954年6月生于重庆市，1981年哈尔滨理工大学电机专业研究生毕业。1985年和1992年分别赴加拿大和英国进修。目前是教育部教学指导委员会电气工程及其自动化分委员会委员。曾获原机械工业部“中国机械工业科技专家”和“跨世纪学科带头人”称号。在美、英和国家级学会主办的学术刊物上发表论文14篇，在其他核心刊物和学术会议上发表论文20余篇。

# 目 录

前言

主要符号表

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 交流电机动态分析的发展 .....	1
1.2 交流电机动态分析的特点和步骤 .....	3
1.3 常用的数学方法 .....	6
1.4 坐标变换 .....	10
1.5 常用的坐标系和坐标变换 .....	13
1.6 交流电机的等效电路 .....	24
参考文献 .....	31
<b>第 2 章 三相感应电动机的运动方程</b> .....	33
2.1 在 ABC 坐标系中感应电动机的运动方程 .....	33
2.2 在 $\alpha\beta 0$ 坐标系中感应电动机的运动方程 .....	39
2.3 转子量变换到定子坐标系时感应电动机的运动方程 .....	44
2.4 用空间向量表示时感应电动机的运动方程 .....	49
2.5 在任意转速的通用坐标系中感应电动机的运动方程 .....	52
2.6 感应电动机的状态方程 .....	55
2.7 双笼型感应电动机的运动方程 .....	61
参考文献 .....	65
<b>第 3 章 感应电动机的动态分析</b> .....	67
3.1 恒速投入电网时三相感应电动机的电磁瞬态 .....	67
3.2 感应电动机起动过程的动态分析 .....	75
3.3 突加负载时感应电动机的动态过程 .....	77
3.4 感应电动机瞬间断电重新投入电网时的动态过程 .....	80
3.5 三相感应电动机的突然短路 .....	84
参考文献 .....	90
<b>第 4 章 同步电机的运动方程</b> .....	91
4.1 在相坐标系中同步电机的运动方程 .....	91
4.2 $dq0$ 坐标系中同步电机的运动方程 .....	97
4.3 同步电机的标么值 .....	104
4.4 用标么值表示时 $dq0$ 坐标系中同步电机的运动方程 .....	107
4.5 在 $\alpha\beta 0$ 坐标系中同步电机的运动方程 .....	112
4.6 用 120 分量和空间向量表示时同步电机的运动方程 .....	115

4.7 同步电机的状态方程 .....	118
4.8 同步电机的运算电抗和等效电路 .....	124
4.9 用微分算子形式的运算电抗和传递函数表示时, $\alpha\beta 0$ 和 120 坐标系中的 磁链方程 .....	142
参考文献 .....	144
<b>第 5 章 同步电机的稳态异步运行</b> .....	146
5.1 同步电机的对称稳态同步运行 .....	146
5.2 同步电动机的稳态异步运行 .....	149
5.3 同步电机的负序电抗 .....	157
5.4 功角作正弦小振荡时同步电机的电磁转矩 .....	163
5.5 正弦大振荡时同步电机的整步转矩和阻尼转矩系数 .....	169
参考文献 .....	172
<b>第 6 章 同步电机的动态分析</b> .....	174
6.1 同步发电机的三相突然短路 .....	174
6.2 线间突然短路 .....	183
6.3 单相突然短路 .....	197
6.4 定子接有电容时同步电机的运行 .....	206
6.5 同步电动机突加负载时的动态分析 .....	214
6.6 凸极同步电动机的牵入同步 .....	219
参考文献 .....	227
<b>第 7 章 变频器供电时交流电动机的运行</b> .....	229
7.1 变频器供电的特点 .....	229
7.2 方波变频器供电时三相感应电动机的运行 .....	240
7.3 脉宽调制变频器供电时感应电动机的运行 .....	249
7.4 感应电动机的向量控制 .....	257
7.5 同步电动机的向量控制 .....	262
参考文献 .....	266
<b>附录</b> .....	268
附录 A 凸极同步电机定子绕组的自感和互感 .....	268
附录 B $dq0$ 变换的导出 .....	271
附录 C 某些数学表达式的傅氏级数展开 .....	274
附录 D 感应电动机的自感、互感和 T 形等效电路中各电抗的关系 .....	276
附录 E 感应电动机起动过程动态计算源程序 .....	281
附录 F 同步电机动态计算源程序 .....	289

# 第 1 章 绪 论

本章先介绍交流电机动态分析的发展过程和动态分析的步骤；接着，作为预备知识，对求解常微分方程的两个常用数学方法作出简要说明；最后对动态分析中常用的坐标变换和等效电路问题作出较为详细的说明。这些方法和内容，在其他各章中都会用到。

## 1.1 交流电机动态分析的发展

20 世纪初，交流电机的基本类型及其稳态运行理论已经基本建立。1920 年以后，交流电机理论的发展进入一个新时期，即瞬态和动态运行理论的建立和发展时期。此时期大体上又可分成三个阶段，下面作一简介。

### 1. 交流电机瞬态分析理论的建立

1926~1930 年，道赫提 (Doherty) 和聂克尔 (Nickle) 发表了五篇经典论文，阐明了同步电机的气隙磁导、稳态运行时同步电机的电压方程、同步电抗和功角特性；瞬态时的功角特性；同步发电机的单相突然短路和三相突然短路等一系列问题；发展了勃朗台尔 (Blondel) 的双反应理论，初步建立起瞬态分析的理论 and 近似计算方法。同一时期，司蒂芬生 (Stevenson) 和派克 (Park)，以及魏斯曼 (Wiesmann) 又提出了气隙磁场、槽内和极间漏磁场的图解确定法，阿尔求 (Alger)、派克 (Park)、基尔国 (Kilgore) 又先后提出了电枢漏抗、同步电抗和直轴瞬态电抗的计算方法和计算公式，为同步电机稳态和瞬态参数的计算确立了基础。

1928 年，派克 (Park) 发表了“理想同步电机的定义和电枢磁链公式”一文。1929 年，派克又发表了“同步电机的双反应理论 (I) 一通用分析方法”的经典论文，提出了  $dq0$  变换和著名的派克方程，以及运算电抗的概念等一系列思想。以后，又经过沃林 (Waring)、克拉莱 (Crary)、康柯蒂亚 (Concordia)、阮京 (Rankin)、司坦莱 (Stanley) 和克拉克 (Clarke) 等一批学者的努力，使交流电机的瞬态分析理论得以建立。

### 2. 通用电机理论的建立

1935~1938 年，经过对各类电机的综合考察， Kron (Kron) 提出了原型电机的概念，并用电磁学和力学的基本定律 (或汉弥尔登原理和拉格朗日方



程)导出了原型电机的运动方程。原型电机有两种,一种是定、转子绕组的轴线在空间均为固定不动的第一种原型电机;另一种是定子绕组轴线在空间固定不动、转子绕组轴线在空间以转子转速旋转的第二种原型电机。以张量为工具, Kron 阐明,任何电机的运动方程都可以从原型电机的运动方程导出,线圈的连接、电刷或集电环的引入,对称分量法或其他各种分量的应用等等,都相当于一定的坐标变换。这一理论称为通用电机理论。

从原型电机出发,经过下列步骤,即可导出所研究电机的运动方程:

(1) 先列出所研究电机的动态电路模型。

(2) 把此模型与具有相应线圈数的原型电机对比,建立“联系张量”。

(3) 从原型电机的运动方程出发,通过联系张量进行规定的变换,即可导出所研究电机的运动方程。

通用电机理论的建立,不但揭示了各种电机和各种分析方法之间的联系,从而使电机理论趋于统一,而且还为许多复杂问题的求解提供了途径,所以它是电机理论的一个重大发展。

以后, Kron 又提出了建立旋转电机等效电路的条件,以及稳态和瞬态情况下各种电机的等效电路。

### 3. 计算机的引入和交流电机动态分析的实现

1940年和1951年,莱昂(Lyon)和顾毓琇先后提出了120分量和 $fb0$ 分量,这两种分量都是复数分量。1954年,柯伐煦(Kovács)提出了空间向量法,并导出在角速度为任意值 $\omega_k$ 的旋转坐标系中,感应电机的空间向量电压方程,为感应电机的调速和转矩控制打下了理论基础。但是在计算机引入以前,对交流电机的绝大部分分析和研究工作都是针对瞬态问题进行的;对于转速为未知量的动态问题,除极少数借助于微分分析器和动态模型机组而得到解答之外,其余则无法求出解答。

1965年以后,计算机逐步被引入到电机工程的各个领域,先是模拟计算机,然后是数字计算机。由于数字计算机的快速发展和各种数值方法和软件包的应用,目前在微机上即可较快和方便地算出电机内的磁场分布、参数的不饱和及饱和值。由于状态方程和数值解法的引入,动态运行时交流电机的非线性方程亦得以顺利解出,使各种动态问题的计算、分析得以实现。这是电机分析中的又一次突破。

1971年,勃拉舒克(Blaschke)根据坐标变换理论,将交流电机的磁场解耦,模拟直流电机转矩的控制规律,提出交流电机的“向量变换控制”,加上电力电子和变频技术的发展,使交流电机的调速和转矩控制技术发生了一次飞跃。